

# Empaques inteligentes y activos: al rescate de tus frutas y verduras

## *Intelligent and active packaging: coming to the rescue of your fruits and vegetables*

*Jesús Roberto Villegas Mendez, Felipe Ávalos Belmontes, Rafael Aguirre Flores y Francisco José González González*

---

### Resumen

Hoy en día, los empaques inteligentes y empaques activos están revolucionando la manera en que conservamos frutas y verduras, especialmente aquellas que siguen madurando después de ser cosechadas (climatéricas). Este artículo explica de forma sencilla cómo los empaques inteligentes permiten monitorear la frescura de los alimentos, mientras que los empaques activos ayudan a alargar su vida útil controlando su ambiente interno. También te contamos de qué materiales suelen estar hechos estos empaques —como plásticos especiales y bioplásticos— y cuáles son los principales factores que deterioran frutas y verduras. Además, exploramos investigaciones recientes que buscan mejorar los materiales para hacerlos aún más útiles, agregándoles propiedades antimicrobianas o antioxidantes. La combinación de estos dos tipos de empaques promete no sólo productos más frescos y seguros, sino también menos desperdicio de alimentos y mejores condiciones para productores y consumidores.

**Palabras clave:** empaques, frutas, verduras, conservación, frescura

### CÓMO CITAR ESTE TRABAJO

Villegas Mendez, J. R., Ávalos Belmontes, F., Aguirre Flores, R., y González González, F. J. (2025, mayo-julio). Empaques inteligentes y activos: al rescate de tus frutas y verduras. *Revista Digital Universitaria (RDU)*, 26(3). <https://doi.org/10.22201/ceide.16076079e.2025.26.3.4>

---

### Abstract

Today, intelligent and active packaging are revolutionizing the way we preserve fruits and vegetables, especially those that continue to ripen after being harvested (climacteric). This article explains in simple terms how intelligent packaging allows for monitoring the freshness of food, while active packaging helps extend its shelf life by controlling its internal environment. We also explain the materials commonly used in these packages—such as special plastics and bioplastics—and the main factors that deteriorate fruits and vegetables. Additionally, we explore recent research aimed at improving materials to make them even more useful, by adding antimicrobial or antioxidant properties. The combination of these two types of packaging promises not only fresher and safer products but also less food waste and better conditions for producers and consumers.

**Keywords:** packaging, fruits, vegetables, preservation, freshness

**Jesus Roberto Villegas Mendez**

*Universidad Autónoma de Coahuila, México*

Estudiante del Doctorado en Ciencia y Tecnología de Materiales en la Universidad Autónoma de Coahuila (UadeC). Posee una maestría en Ciencias con orientación en materiales de construcción por la Universidad Autónoma de Nuevo León (UANL) y es ingeniero civil por la Universidad Juárez del Estado de Durango (UJED). Su labor investigativa se ha enfocado en el estudio de plásticos para empaques de alimentos y materiales de cambio de fase para el ahorro energético en el sector de la construcción.

 [jesus.villegas@uadec.edu.mx](mailto:jesus.villegas@uadec.edu.mx)

 [0000-0001-9595-0823](https://orcid.org/0000-0001-9595-0823)

**Felipe Ávalos Belmontes**

*Universidad Autónoma de Coahuila, México*

Egresado de la Facultad de Ciencias Químicas de la Universidad Autónoma de Coahuila (UadeC) y obtuvo su doctorado en la Universidad Complutense de Madrid (UCM) en 1990. Ha sido conferencista en diversos escenarios nacionales e internacionales y es miembro activo de varias asociaciones científicas y tecnológicas. Además, forma parte del cuerpo editorial de diversas revistas científicas. Ávalos es consultor en la industria del procesado y transformación de plásticos y actualmente se desempeña como profesor a nivel licenciatura y posgrado en la UadeC. Es miembro del Nivel 2 del Sistema Nacional de Investigadores.

 [favalos@uadec.edu.mx](mailto:favalos@uadec.edu.mx)

 [0000-0001-9830-8596](https://orcid.org/0000-0001-9830-8596)

**Rafael Aguirre Flores**

*Centro de Investigación en Química Aplicada, México*

Doctor en Materiales por la Universidad Autónoma de Coahuila (UadeC) y actualmente es Investigador Titular en el Centro de Investigación en Química Aplicada (CIQA). Es responsable del área de Diseño y Manufactura Aditiva en el CIQA y ha liderado diversos proyectos de desarrollo industrial. Sus líneas de investigación incluyen materiales compuestos, la predicción de propiedades con mínimas concentraciones de fases dispersas, el desarrollo de filamentos compuestos para manufactura aditiva y sistemas híbridos para la misma.

 [rafael.aguirre@ciqa.edu.mx](mailto:rafael.aguirre@ciqa.edu.mx)

 [0000-0003-4391-6978](https://orcid.org/0000-0003-4391-6978)

**Francisco José González González**

*Universidad Autónoma de Coahuila, México*

Ingeniero químico por la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (UASLP), con una maestría en Nanociencias y Materiales y un Máster Europeo de Alta especialización en Plásticos y Cauchos. Realizó su tesis doctoral en el Instituto de Ciencia y Tecnología de Polímeros (ICTP-CSIC) en Madrid, España. Su principal área de interés es el desarrollo de materiales compuestos poliméricos conductores para aplicaciones en el campo de la energía. Desde 2020, se desempeña como catedrático-investigador en el Departamento de Ciencia y Tecnología de Polímeros de la Universidad Autónoma de Coahuila (UadeC).

 [fgonzalezgonzalez@uadec.edu.mx](mailto:fgonzalezgonzalez@uadec.edu.mx)

 [0000-0001-9829-1464](https://orcid.org/0000-0001-9829-1464)

## Introducción

El consumo de frutas y verduras es esencial para el ser humano debido a su alto valor nutricional, el cual depende de la calidad y frescura de los alimentos. Los sistemas tradicionales de conservación, como el empaquetado y el control de temperatura, juegan un papel crucial en la preservación de estos productos desde su cosecha hasta su consumo. Sin embargo, los métodos utilizados hasta ahora no han sido suficientes para extender significativamente la vida útil de los alimentos. Se estima que sólo el 60% de las frutas y verduras cosechadas se aprovecha para el consumo humano, mientras que el 40% restante se pudre durante su venta (Xia et al., 2022).

Una solución alternativa a los contenedores tradicionales es la aplicación de sistemas de empaques inteligentes (EI) y empaques activos (EA), los cuales pueden incrementar el porcentaje de producto aprovechable. Pero, ¿qué es un empaque inteligente? Un EI es un contenedor capaz de dar seguimiento a la variación de características como textura, color, sabor u olor del producto que contiene, desde su empaquetado hasta su consumo (Caicedo-Perea et al., 2022).

Y entonces, ¿a qué se le llama empaques activos? Los EA son envases diseñados para incrementar el tiempo de preservación de la calidad nutricional del alimento. Este tipo de empaques puede utilizarse desde la recolección hasta el consumo del producto (Vallejos et al., 2022).

Tanto los EI como los EA pueden emplearse en frutas y verduras climatéricas y no climatéricas, es decir, en alimentos que siguen madurando después de cosechados y en los que no lo hacen. Este artículo se enfoca especialmente en la preservación de los frutos climatéricos, ya que requieren un cuidado especial desde su recolección, empaquetado y transporte, hasta que finalmente llegan al consumidor.



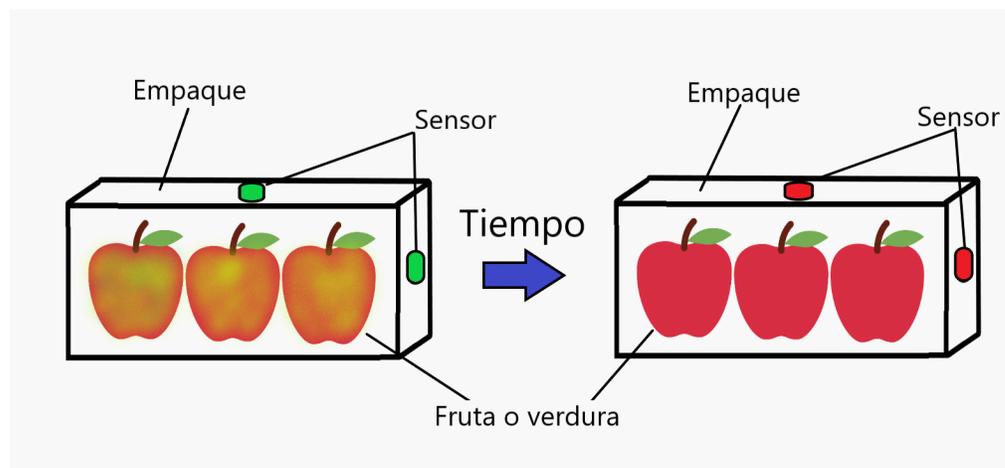
**Video 1.** El químico Javier Pérez Castells explica qué son las frutas climatéricas y cómo siguen madurando después de ser cosechadas (El Debate, 2023).

En este contexto, el objetivo de esta revisión es explicar el uso de EI y EA en frutas y verduras climatéricas, abordando su definición, los materiales con los que se fabrican, sus mecánicas de funcionamiento y las investigaciones más recientes sobre la modificación de materiales para proveerlos de características útiles en dichos contenedores.

## ¿Empaques inteligentes... qué tanto?

Los empaques inteligentes informan al consumidor sobre la calidad, frescura y seguridad del producto desde su empaquetado hasta su consumo. Pero, ¿cómo funcionan? Actúan mediante sensores que reaccionan física o químicamente ante alteraciones del ambiente dentro del contenedor, como cambios en la temperatura, el pH o la concentración de gases. Estos cambios son detectados por un sensor, que puede mostrar, por ejemplo, un cambio de color o presentar un número, una letra o hasta una palabra relacionada con el tipo de cambio ocurrido.

¿Y para qué sirve conocer estas alteraciones? Estos indicadores pueden relacionarse con cambios en la calidad del alimento o incluso señalar la presencia de microbios dentro del empaque (Caicedo-Perea et al., 2022). Por ejemplo, la figura 1 muestra un tipo de empaque inteligente en el que, en una primera etapa (izquierda), el sensor incrustado muestra un punto verde, indicando que la fruta aún no ha alcanzado las características óptimas para el consumo. Tras un tiempo de envasado, el sensor cambia a color rojo para señalar que la fruta está lo suficientemente madura para su consumo.



**Figura 1.** Ejemplo ilustrativo del desempeño de un empaque inteligente (EI).

*Crédito:* Jesús Roberto Villegas Mendez.

No todos los empaques inteligentes son tan sofisticados. ¿Sabías que los contenedores tradicionales ya incluyen algo de “inteligente”? Así es, los empaques que usas a diario ya tienen incorporados elementos básicos de los empaques inteligentes. Estos elementos incluyen datos como la fecha de caducidad o la información nutricional. Además, la información transmitida por los ei puede ser pasiva o activa. Para entender mejor, a continuación se describen estos dos tipos de información (Rodríguez-Sauceda et al., 2014):

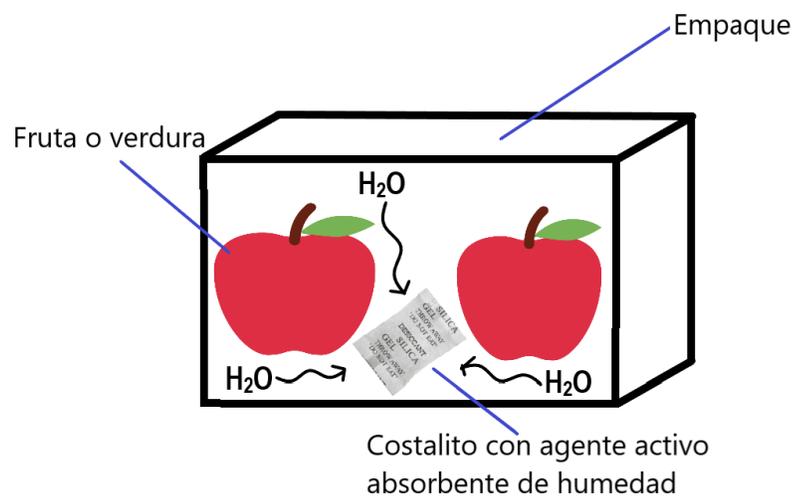
- **Pasiva.** Se refiere a los datos impresos en el empaque al finalizar el envasado, como la declaración nutrimental, la fecha de caducidad, las condiciones de almacenamiento, entre otros.
- **Activa.** Esta información se genera mediante sensores y define el estado de madurez del alimento empaquetado, desde su envasado hasta su consumo. La información activa se puede consultar en tiempo real y en cualquier momento, como la temperatura o el estado de madurez, entre otros.

## Empaques activos, de día y de noche

Los empaques activos tienen la capacidad de controlar el crecimiento de microbios y/o aumentar la vida útil de los alimentos en anaquel. Estos contenedores pueden utilizarse desde la recolección hasta la ingesta del alimento. Los EA mantienen un ambiente regulado en su interior, el cual proporciona las condiciones adecuadas para la preservación del producto empaquetado. Para generar este ambiente, se emplean agentes activos con alguna de las siguientes funciones (Vilela et al., 2018):

- Emitir sustancias que detienen o matan microbios (antimicrobianas), como dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) o nitrógeno.
- Captar humedad, oxígeno ( $\text{O}_2$ ) o, en el caso de frutas y verduras, compuestos que propician su maduración, como el etileno<sup>1</sup>.

Las formas más comunes en las que los agentes activos se utilizan en los empaques activos son: contenidos en “costalitos” o en combinación con el material del envase (matriz). Aunque los costalitos son los más comunes y fáciles de utilizar, ya que simplemente se llenan con el agente y se colocan dentro del empaque, tienen algunas desventajas. Pueden romperse o producir fugas del agente durante su desempeño, lo que ocasionaría que el producto se contamine y, al ser consumido, podría causar daño a la salud. Un ejemplo de esto es un costalito que cumple la función de absorber la humedad del interior del empaque, lo cual ayuda a reducir el crecimiento de microbios en el fruto contenido (ver figura 2) (Yildirim y Röcker, 2018).

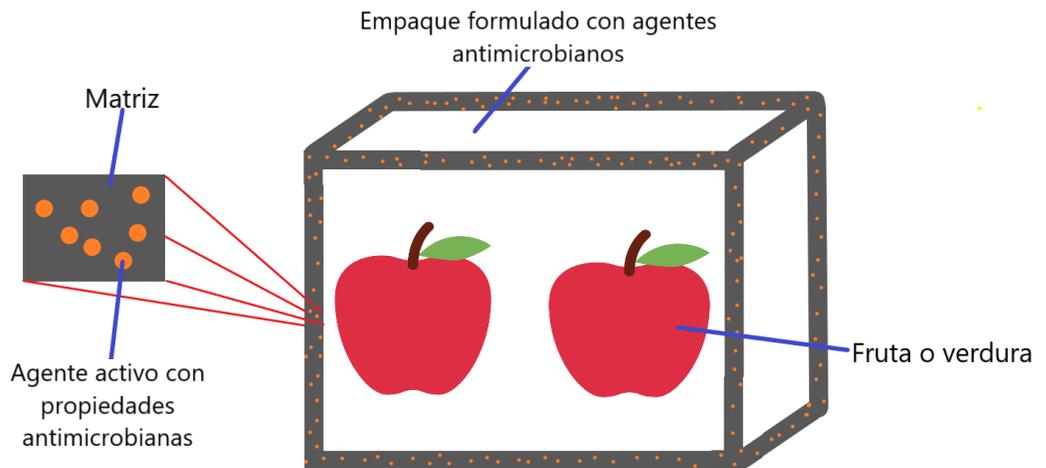


**Figura 2.** Imagen muestra de un empaque activo (EA) que utiliza un costalito absorbente de humedad.

*Crédito:* Jesús Roberto Villegas Mendez.

<sup>1</sup>Etileno: gas considerado una hormona del crecimiento para las frutas y verduras climatéricas, ya que promueve su maduración (Wei et al., 2021).

Por otro lado, la combinación del agente activo y la matriz puede realizarse mediante una mezcla directa de ambos o cubriendo la superficie interior del contenedor con el agente. La figura 3 ilustra un EA donde el agente está mezclado con el material utilizado para la fabricación del envase. En este caso, el contenedor tiene propiedades antimicrobianas que sirven para controlar el crecimiento de microorganismos en el fruto. Si bien la combinación del agente y la matriz no requiere accesorios adicionales en el interior del contenedor, como en el caso de los costalitos, es fundamental verificar que el agente no contamine el alimento para poder desarrollar este tipo de empaques activos (Vallejos et al., 2022).



**Figura 3.** Representación de un empaque activo donde se mezcló el agente activo y la matriz.

*Crédito:* Jesús Roberto Villegas Mendez.

### ¿Con qué se suelen fabricar los EI y EA?

El vidrio, la madera y el cartón son algunos de los materiales con los que se pueden fabricar empaques inteligentes y activos, pero los plásticos son los más utilizados para este fin. La resistencia, ligereza y relativa facilidad de manufactura son algunas de las propiedades que hacen que los plásticos sean la opción más destacada en este tipo de contenedores. Los plásticos más utilizados en los ei y ea son (Vallejos et al., 2022; Yadav et al., 2021; Yu et al., 2021):

- **Polietileno (PE).** Es un plástico derivado del petróleo, flexible, inerte, reciclable y considerado el más utilizado para la manufactura de empaques de alimentos. Con este plástico se pueden moldear botellas, láminas, películas, bolsas y contenedores.
- **Poliestireno (PS).** Es un plástico sintetizado a partir de subproductos de hidrocarburos fósiles, caracterizado por ser rígido, transparente y reciclable. Con el PS se fabrican empaques en forma de bandejas transparentes.
- **Ácido poliláctico (PLA).** Este plástico biodegradable se deriva de procesos biotecnológicos que utilizan productos ricos en almidón como materia prima (papa, maíz, arroz, etc.). Es rígido, con mayor transparencia y propiedades mecánicas similares a las del PE.

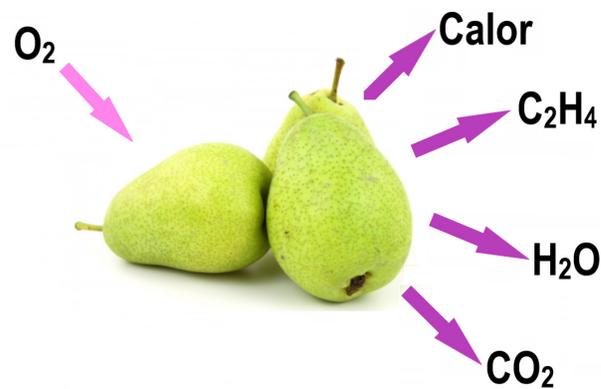
- **Quitosano (qs).** Este material bioplástico se sintetiza a partir del exoesqueleto de los crustáceos. Se caracteriza por ser biodegradable, de fácil maleabilidad, rígido y destaca por sus propiedades antimicrobianas contra mohos, bacterias y levaduras.

## Lo que se debe cuidar en una fruta o verdura empaquetada

Las frutas y verduras climatéricas, desde su recolección hasta su consumo, están expuestas a diversos factores que pueden deteriorarlas. La continua maduración de estos productos es una de sus características más importantes, ya que, entre más maduro esté un fruto, mayor es su contenido de azúcares y nutrientes, lo que lo convierte en un medio ideal para el cultivo de microorganismos (Álvarez-Hernández et al., 2021).

## ¿Por qué siguen madurando las frutas y verduras climatéricas después de ser cosechadas?

Esto se debe a que, una vez recolectadas, las frutas y verduras continúan su ciclo de respiración. Este ciclo implica que el fruto absorbe oxígeno del entorno y produce dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ), calor, vapor de agua y etileno ( $\text{C}_2\text{H}_4$ ) (figura 4). Precisamente, la generación de  $\text{C}_2\text{H}_4$  durante la maduración dentro del empaque incrementa su concentración, lo que acelera exponencialmente la maduración del fruto. En otras palabras, el  $\text{C}_2\text{H}_4$  actúa como hormona de maduración en las frutas y verduras climatéricas, y a través de la maduración se generan cambios en la textura, sabor, olor y color del fruto (Wei et al., 2021).



**Figura 4.** Representación gráfica de la respiración de una fruta climatérica.

*Crédito:* Jesús Roberto Villegas Mendez.

Existen varias opciones para controlar el efecto del  $\text{C}_2\text{H}_4$  en las frutas y verduras climatéricas (Wei et al., 2021):

- Modificar genéticamente el fruto para que no produzca  $\text{C}_2\text{H}_4$ .
- Añadir sustancias químicas al fruto que bloqueen la generación de  $\text{C}_2\text{H}_4$ .
- Utilizar agentes activos que retengan u oxiden el  $\text{C}_2\text{H}_4$ .

Para controlar el efecto del  $C_2H_4$ , se han desarrollado empaques activos (EA) que retienen u oxidan este gas. Por ejemplo, se han elaborado bolsas con una matriz de polietileno (PE) adicionadas con minerales porosos que actúan como absorbentes de  $C_2H_4$ . El uso de estas bolsas en el empaquetado de brócoli incrementó la preservación del fruto por 15 días más en comparación con una bolsa de PE sin adición (Wei et al., 2021). También se han diseñado costalitos con permanganato de potasio<sup>2</sup> y sepiolita (mineral poroso) para oxidar el  $C_2H_4$ . Estos costalitos fueron colocados junto con albaricoques dentro de un empaque de plástico, y se determinó que su uso incrementó la vida útil de los frutos en comparación con un empaque sin costalitos (Álvarez-Hernández et al., 2021).

El crecimiento de microbios es otro factor crítico que afecta la vida útil y la seguridad de los alimentos. Para mitigar este riesgo, se ha modificado materiales para dotarlos de propiedades antimicrobianas, con posible aplicación en sistemas de empaques activos. Una de las modificaciones más destacadas es la integración de agentes que puedan inhibir el crecimiento de microorganismos o causar la muerte celular de las bacterias. Algunos ejemplos de agentes con estas propiedades son (Chawla et al., 2021):

- Aceites esenciales (orégano, clavo, pimienta, entre otros).
- Extractos de plantas (té verde, orégano, ajo, etc.).
- Óxidos metálicos (óxido de zinc, óxido de titanio, óxido de magnesio, etc.).

Además de estos agentes activos, la matriz en sí misma puede tener propiedades antimicrobianas. Por ejemplo, el quitosano (qs). Un estudio orientado a la obtención de materiales con propiedades antimicrobianas fue el realizado por Yadav et al. (2021), quienes desarrollaron películas a base de quitosano, óxido de zinc y ácido gálico con propiedades antimicrobianas y antioxidantes, con posibilidad de ser utilizadas en empaques activos. Otro estudio, realizado por Lan et al. (2021), elaboró películas de qs adicionadas con óxido de titanio y bagazo de manzana roja. Estas películas mostraron propiedades antimicrobianas y antioxidantes orientadas a su aplicación en envases activos.

Aunque el desarrollo de nuevos empaques inteligentes y activos sigue en investigación, ya existen productos comerciales como SuperFresh™, una almohadilla utilizada en contenedores de carne de pescado, que libera  $CO_2$  al reaccionar con el agua en el empaque, prolongando la vida útil del producto. Otro ejemplo comercial es PEAKfresh®, una marca de bolsas de plástico capaces de absorber  $C_2H_4$ , utilizadas para envolver frutas y verduras y así preservarlas en el refrigerador por más tiempo. Además, están las comunes almohadillas que se colocan debajo de las carnes en los supermercados, que, por si no lo sabías, sirven para absorber el agua en el interior de la bolsa, reduciendo la probabilidad de derrames de líquidos y el desarrollo de microbios.

El mayor reto para el desarrollo de nuevos empaques inteligentes y activos, además de garantizar que no perjudiquen la salud, es su fabricación. Muchos de los agentes activos no soportan las altas temperaturas de fabricación de algunos plásticos, lo que lleva a su descomposición. También es importante tener en cuenta

<sup>2</sup>Permanganato de potasio: compuesto químico con la capacidad de oxidar  $C_2H_4$  (Álvarez-Hernández et al., 2021).

que la adición de agentes activos en plásticos puede afectar negativamente la flexibilidad, dureza y elasticidad del empaque resultante (Vallejos et al., 2022).

## Conclusiones

De acuerdo con la literatura, es evidente que el uso de empaques inteligentes y empaques activos en frutas y verduras climatéricas ofrece al consumidor productos de mayor calidad, fresca y una mayor vida útil en anaquel. Por lo tanto, la propuesta de utilizar conjuntamente estos dos sistemas podría mejorar la trazabilidad, la seguridad y la durabilidad del alimento contenido, lo que contribuiría a reducir tanto las pérdidas para los productores de la cosecha como los riesgos para la salud derivados del consumo de alimentos en mal estado.

Sin embargo, existen limitaciones técnicas relacionadas con las condiciones de fabricación de los plásticos y el riesgo de descomposición de los agentes durante este proceso, lo que representa un desafío para el desarrollo de nuevos envases. Finalmente, se puede concluir que, aunque los empaques inteligentes (EI) y activos (EA) son una solución prometedora para aumentar el aprovechamiento de los alimentos, es fundamental que el manejo y el consumo consciente continúen siendo prioritarios para la reducción del desperdicio alimentario.

## Referencias

- ❖ Álvarez-Hernández, M. H., Martínez-Hernández, G. B., Castillejo, N., Martínez, J. A., y Artés-Hernández, F. (2021). Development of an antifungal active packaging containing thymol and an ethylene scavenger. Validation during storage of cherry tomatoes. *Food Packaging and Shelf Life*, 29, 100734. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2021.100734>
- ❖ Caicedo-Perea, C., Solis-Molina, M., y Jiménez-Rosero, H. (2022). Empaques inteligentes: definiciones, tipologías y aplicaciones. *Informador Técnico*, 86(2), 220–253. <https://doi.org/10.23850/22565035.3985>
- ❖ Chawla, R., Sivakumar, S., y Kaur, H. (2021). Antimicrobial edible films in food packaging: Current scenario and recent nanotechnological advancements- a review. *Carbohydrate Polymer Technologies and Applications*, 2, 100024. <https://doi.org/10.1016/j.carpta.2020.100024>
- ❖ El Debate. (2023, 25 de enero). Frutas climatéricas, el alimento que te revela Pérez Castells [Video], YouTube. [https://youtu.be/FpL\\_m1RdGq8?feature=shared](https://youtu.be/FpL_m1RdGq8?feature=shared).
- ❖ Lan, W., Wang, S., Zhang, Z., Liang, X., Liu, X., y Zhang, J. (2021). Development of red apple pomace extract/chitosan-based films reinforced by TiO<sub>2</sub> nanoparticles as a multifunctional packaging material. *International Journal of Biological Macromolecules*, 168, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.051>
- ❖ Rodríguez-Sauceda, R., Rojo-Martínez, G. E., Martínez-Ruiz, R., Piña-Ruiz, H. H., Ramírez-Valverde, B., Vaquera-Huerta Milagros de la, H. C., y Ximhai, R. (2014). *Envases inteligentes para la conservación de alimentos*. 10, 151–173. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=46132135012>



- ❖ Vallejos, S., Trigo-López, M., Arnaiz, A., Miguel, Á., Muñoz, A., Mendía, A., y García, J. M. (2022). From Classical to Advanced Use of Polymers in Food and Beverage Applications. *Polymers*, 14(22), 4954. <https://doi.org/10.3390/polym14224954>
- ❖ Vilela, C., Kurek, M., Hayouka, Z., Röcker, B., Yildirim, S., Antunes, M. D. C., Nilsen-Nygaard, J., Pettersen, M. K., y Freire, C. S. R. (2018). A concise guide to active agents for active food packaging. *Trends in Food Science and Technology*, 80, 212–222. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2018.08.006>
- ❖ Wei, H., Seidi, F., Zhang, T., Jin, Y., y Xiao, H. (2021). Ethylene scavengers for the preservation of fruits and vegetables: A review. *Food Chemistry*, 337, 127750. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127750>
- ❖ Xia, W., Felicia, L., Rovina, K., Merilyn Vonnice, J., Aqilah, N. N., Husna Erna, K., y Mailin, M. (2022). Consolidating plant-based essential oils onto polysaccharides-based coatings: Effect on mechanisms and reducing postharvest losses of fruits. *Applied Food Research*, 2, 100226. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2022.100226>
- ❖ Yadav, S., Mehrotra, G. K., y Dutta, P. K. (2021). Chitosan based ZnO nanoparticles loaded gallic-acid films for active food packaging. *Food Chemistry*, 334, 127605. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2020.127605>
- ❖ Yildirim, S., y Röcker, B. (2018). Active packaging. En P. R. C. Miguel Ângelo, L. Jose Maria, P. C. Lorenzo Miguel, & M. de O. S. V. António Augusto (Eds.), *Nanomaterials for Food Packaging: Materials, Processing Technologies, and Safety Issues* (pp. 173–202). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-51271-8.00007-3>
- ❖ Yu, F., Fei, X., He, Y., y Li, H. (2021). Poly(lactic acid)-based composite film reinforced with acetylated cellulose nanocrystals and ZnO nanoparticles for active food packaging. *International Journal of Biological Macromolecules*, 186, 770–779. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2021.07.097>

Recepción: 2023/11/17.  
Aceptación: 2024/09/15.  
Publicación: 2025/05/09.

